

УСКОРИТЕЛИ И ВСТРЕЧНЫЕ ПУЧКИ

Г. И. БУДКЕР

Институт ядерной физики, Новосибирск.

Физика взаимодействия элементарных частиц определяется в конечном счете их энергией в системе центра инерции. В этом смысле и говорят, что реакции происходят в системе центра масс. В любой науке экспериментатор, как правило, находится в той системе, где происходят изучаемые реакции, и только в физике высоких энергий экспериментатор со всем его оборудованием движется со скоростью, близкой к скорости света относительно этой системы. Эта ситуация сложилась исторически, и все привыкли к ней. Теоретики, правда, всегда работали в системе центра инерции. Экспериментаторам сделать это оказалось значительно сложнее.

Качество ускорительной установки определяется ее светимостью, которая будучи умноженной на сечение процесса, дает выход реакции. Светимость пропорциональна плотности сталкивающихся пучков. Так как пучки ускорителей имели малые плотности, приходилось сталкивать их с конденсированным веществом, которое всегда покоится относительно экспериментатора. Этим неудобством, в конце концов, можно было бы пренебречь. Однако в случае крайнего релятивизма только малая доля энергии ускоренных частиц может быть использована для физических реакций (рождение новых частиц, возбуждение, изучение структуры и т. д.):

$$E_{\text{реак}} = \sqrt{\frac{2mc^2}{E_{\text{уск}}}} E_{\text{уск}}$$

Чем больше энергия ускорителя, тем меньшая часть энергии используется для физики, остальная бесполезно тратится на движение центра масс. Поэтому естественно перейти к встречным пучкам, где используемая энергия равна:

$$E_{\text{реак}} = 2 E_{\text{уск}}$$

Реальным вопрос стал после того, как потребовались очень высокие

энергии реакции и научились получать достаточно плотные пучки. Работы практически были начаты с конца 1956 года.

Основными параметрами установки со встречными пучками являются:

1) энергия E (или эквивалентная энергия $E_{\text{эkv}} = \frac{2E^2}{Mc^2}$, т. е. энергия обычного ускорителя, который может дать те же реакции);

2) светимость $L = R \frac{N_1 N_2}{TS}$.

где N_1, N_2 — число частиц в каждом пучке,

T — период обращения,

S — сечение пучка,

R — коэффициент использования.

Лептонные встречные пучки

С самого начала стало ясно, что этот метод наиболее просто и полезно применить для изучения взаимодействия электронов, т. к. он дает наибольший выигрыш в энергии, точнее, обычный метод очень рано становится неэффективным. При этом радиационное затухание, с одной стороны, позволяет производить многократное накопление частиц в одном и том же фазовом объеме, а, с другой стороны, приводит к сильному сжатию поперечных размеров пучка.

Первые установки такого рода со встречными электронными пучками для проверки квантовой электродинамики были сооружены практически одновременно в Стенфорде и Новосибирске. Уже самая малая установка с радиусом дорожки равным 43 см, позволила получить $E_{\text{эkv}} = 100$ Гэв и поэтому открыла для эксперимента с лептонами новую область энергии.

Очень быстро стало ясно, что современный вакуум обеспечивает столь большое время жизни, что возможно также накопление достаточно большого тока позитронов, и таким образом, получение встречных электрон-позитронных пучков, экспериментальные возможности которых гораздо выше. Практически эти установки, кроме проверки квантовой электродинамики и изучения взаимодействия μ -мезонов позволяют изучать реакции сильно взаимодействующих частиц, рождающихся при электрон-позитронной аннигиляции. Эксперименты на таких установках были начаты в Новосибирске в 1966 году, в Орсе в 1967 году и в этом году во Фраскати; в будущем году начнутся эксперименты в Новосибирске и Кембридже при энергии в 2 Гэв с последующим доведением ее до 3—3,5 Гэв. Начато сооружение электрон-позитронного накопителя на 6 Гэв в Новосибирске и на 3 Гэв в Гамбурге; кроме того имеются соответствующие проекты установок в Стенфорде и Орсе на энергию в 3 Гэв.

На работающих установках проведен ряд экспериментов, давших нетривиальные результаты. Проверки квантовой электродинамики в

Стенфорде (2×550 Мэв), в Новосибирске (2×160 Мэв) при упругом электрон-электронном рассеянии, а также при электрон-позитронной аннигиляции в 2γ кванта в Новосибирске (2×510 Мэв) подтвердили квантовую электродинамику с хорошей точностью. Кроме того, в Новосибирске были проведены эксперименты по двойному тормозному излучению, используемому в настоящее время как мониторирующий процесс для изучения других реакций. На установках с электрон-позитронными встречными пучками были проведены эксперименты по рождению векторных мезонов. Исследуя резонансы в рождении π и K -мезонов при электрон-позитронной аннигиляции, были изучены ρ -мезон (Новосибирск, Орсе), ω -мезон (Орсе), φ -мезон (Орсе, Новосибирск), давшие очень интересные результаты по параметрам этих мезонов.

При переходе к более высоким энергиям сечения рождения сильно-взаимодействующих частиц из-за форм-факторов резко падают; в этой области энергий установки со встречными пучками легких частиц представляют интерес для изучения квантовой электродинамики, для решения загадки μ -мезона, а также для поисков новых частиц, сечения рождения которых не нарезаются форм-факторами.

Особое значение имеют встречные пучки электронов для исследования слабого взаимодействия. До сих пор в слабом взаимодействии удалось изучить только его далекий хвост, что и определило значение этого взаимодействия и скудость экспериментальных данных.

Можно определить образ животного по его скелету, труднее по отдельным костям, но пожалуй даже самый опытный палеонтолог не определит облик животного по кончику хвоста. Мало вероятно, чтобы взаимодействие лептонов с нуклонами, в том числе нейтрино с нуклонами, позволило полностью изучить слабое взаимодействие, опять-таки из-за форм-фактора. По-видимому, для изучения слабого взаимодействия нужно будет использовать лептонные взаимодействия при высоких энергиях, что возможно только на встречных пучках.

К сожалению, с ростом энергии электронов падает сечение взаимодействия; из-за квантовых флуктуаций излучения расширяется пучок; из-за роста размеров ускорителя увеличивается период обращения. Все это приводит к уменьшению выхода реакции и требует больших токов. Мощность синхротронного излучения каждого электрона растет как высокая степень энергии. В результате мощность ВЧ-системы и размеры ускорителя растут как высокая степень энергии частиц. Я думаю, что рациональным пределом для встречных пучков электронов и позитронов в традиционном исполнении является 6—10 Гэв. Эту энергию можно было бы увеличить на порядок, если бы это представляло очень большой экспериментальный интерес, за счет резкого увеличения стоимости установки.

С другой стороны, заведомо интересны лептонные взаимодействия при энергии в несколько сот Гэв (в системе центра инерции). Наиболее

удобными частицами для этого являются μ -мезоны. Можно рассмотреть два варианта:

1) μ -мезоны, инжектированные в накопитель, совершают в нем за время жизни независимо от энергии определенное число оборотов: 400 оборотов при магнитном поле 20 кГс и 4000 оборотов—при поле 200 кГс. Используя ускорители высокой энергии с очень большой интенсивностью, как инжекторы μ -мезонов, можно попытаться осуществить встречу μ -мезонов в специальном накопителе. Малое сечение процесса и малый коэффициент конверсии протонов в μ -мезоны с малым разбросом энергии и углов делают эту задачу очень сложной даже при наличии ускорителя протонов на очень высокие энергии;

2) другой метод, разрабатываемый в настоящее время в Новосибирске, предполагает длительное накопление очень большого числа протонов сравнительно небольшой энергии (25 ГэВ), сброс их на мишень с получением в импульсе большого числа μ -мезонов обоих знаков невысокой энергии в хорошем фазовом объеме и дальнейшее совместное ускорение их в специальном безжелезном импульсном ускорителе до высоких энергий, на столике поля которого изучаются реакции при μ -мезонном взаимодействии. Из-за увеличения времени жизни μ -мезонов с энергией ускорение можно осуществлять практически без потерь.

Протонные встречные пучки

Протонные встречные пучки представляют интерес начиная с энергии 10 ГэВ. С другой стороны, у протонов нет радиационного затухания и поэтому без специальных ухищрений невозможно накопление в одном и том же фазовом объеме большого числа импульсов и сжатие пучка. Поэтому с самого начала проект становится дорогостоящим и громоздким. Он требует ускорителя на высокие энергии большой интенсивности и сооружения больших накопительных колец. За осуществление этого проекта взялся ЦЕРН; установка должна быть сооружена в 1970 году.

В Новосибирске некоторое время разрабатывался проект и делались модели безжелезной установки со встречными протон-протонными пучками. Мы отказались от этого проекта, уступающего проекту ЦЕРН по всем параметрам, кроме стоимости.

Новый метод создания эффективного затухания колебаний тяжелых частиц в ускорителях и накопителях, разрабатываемый в Новосибирске, в случае удачных результатов поставленных экспериментов, откроет новые возможности в установках на высокие энергии. Демпфирование колебаний позволяет накапливать большие токи протонов; делает реальным накопление достаточных токов антипротонов; сжимает пучки и резко увеличивает светимость; создает монохроматические и узкие пучки, позволяющие ставить эксперимент с высокой точностью как на высоких, так и на низких энергиях. Кроме того, оно уменьшает требования к инжектору, к размерам накопительных колец и делает проект осуществимым при сравнительно небольших затратах.

В настоящее время в Новосибирске сооружается установка со встречными протон-антипротонными пучками 2×23 Гэв. В конце этого года будут начаты эксперименты по электронному охлаждению. Сооружение накопительного кольца предполагается закончить к концу 1970 года. Светимость установок, сооружаемых в ЦЕРНе и Новосибирске, позволяет измерять сечения до 10^{-35} см².

Если же ограничиваться нормальными сечениями сильных взаимодействий, то можно проводить исследования на встречных пучках и со вторичными частицами (например, π и K -мезонами), при этом соотношение $E_{эф} = \frac{2E^2}{mc^2}$ сохраняется и для экспериментов со вторичными частицами.

В заключение разрешите немного философии.

Каковы соотношение и перспективы ускорителей на встречных пучках и обычных ускорителей, включая так называемые новые методы ускорения? Поскольку это касается легких частиц, накопители открыли новую область исследования, поэтому сравнение не имеет смысла. Поскольку это касается тяжелых частиц, сравнение имеет смысл, и тщательный анализ должен определить соотношение между обоими методами в будущем. Сегодня реальным является сооружение накопительных колец на эквивалентную энергию в $2 \cdot 10^{15}$ эв. Самый большой оптимизм в отношении новых методов ускорения не позволяет близко подойти к этой цифре. Поэтому область самых больших энергий—это область встречных пучков. Что касается энергии 50 Гэв в системе центра инерции (т. е. 1000 Гэв эквивалентной энергии), то обычные ускорители имеют преимущества: 1) в разработанности методов эксперимента; 2) при работе со вторичными частицами, имеющими малое сечение взаимодействия (например, нейтрино). Установки со встречными пучками отличаются дешевой и значительными преимуществами в проведении некоторых экспериментов, так что каждая из лабораторий должна выбирать вариант, исходя из наличия средств, опыта работы и поставленных экспериментальных задач.

Применение электронного охлаждения позволяет по новому подойти к экспериментам на низких и средних энергиях, но большой точности. Требования к монохроматичности ускоренного пучка позволяют использовать только очень малую часть пучка и требуют очень тонкой мишени. Эффективность эксперимента резко падает, и в этом случае обычные ускорители теряют свое основное преимущество перед накопительными кольцами. Между тем электронное охлаждение позволяет иметь в накопителе большой циркулирующий ток протонов, в миллионы раз превышающий выпущенные токи ускорителей с монохроматичностью 10^{-4} и выше при очень малом размере пучка. Используя в виде мишени ускоренный второй пучок или очень тонкую струйку газа, так чтобы потери энергии компенсировались ВЧ-системой, а разброс потерь и многократное рассеяние—электронным охлаждением, можно проводить очень тонкие эксперименты. Светимость установки при этом оказывается высокой

и позволяет изучать процессы с сечением 10^{-33} см² и ниже с точностью 10^{-4} и выше.

Вторым философским вопросом является выбор между электронными и протонными ускорителями. Великолепные результаты, полученные в последнее десятилетие на протонных ускорителях, а также на электронных ускорителях, где главные эксперименты ведутся также на взаимодействии электронов с нуклонами, создавали ощущение, что разгадка структуры элементарных частиц и природы ядерного взаимодействия будет решена на таких ускорителях, коль скоро их энергия будет достаточно высокой. Это приводило к строительству все больших и больших ускорителей, и действительно каждый новый ускоритель давал новые принципиальные сведения. Одновременно, однако, было открыто зловещее в этом плане явление—наличие формфактора сильно взаимодействующих частиц. Формфактор зарезает сечения всех процессов с большой передачей импульса в каждом канале реакции. При этом может оказаться, что такие явления, как рождение очень тяжелых частиц и другие аналогичные процессы могут не наблюдаться в сильном взаимодействии. Между тем их значение может быть принципиальным в создаваемой теории элементарных частиц.

Если говорить на простом языке, то адроны представляют собой большие, но рыхлые образования, имеющие большое сечение взаимодействия, но с ростом энергии способные производить только множественные процессы, а не что-то очень существенное. И может оказаться, что сильное взаимодействие, вообще говоря, не является фундаментальным—нечто вроде Ван-дер-Ваальсовых сил в атомном взаимодействии.

Сечение лептонных взаимодействий при высоких энергиях растет с энергией за счет слабых взаимодействий. Пока что нет оснований ожидать уменьшения этого роста без каких-то новых фундаментальных открытий. Не было бы странным, если бы слабое взаимодействие оказалось основным и фундаментальным. Не исключено, конечно, что существует другой тип взаимодействий, неизвестный в настоящее время. Однако, обращаться к такой гипотезе имело бы смысл только после изучения известных взаимодействий и особенно слабого, которое практически не изучено.

Поскольку это касается энергий в несколько десятков Гэв (до 1000 Гэв эквивалентной энергии обычного ускорителя), то приоритет, видимо надо отдать сильному взаимодействию, поскольку там будет открыто еще много новых интересных явлений, в то время как на встречных лептонных пучках число интересных экспериментов более ограничено.

Однако этот вопрос становится более неясным при переходе к существенно большим энергиям в сотни и тысячи Гэв в системе центра инерции.

Так как это весьма сложные и дорогостоящие установки, то вряд ли какая-либо лаборатория может себе позволить строительство и того и другого одновременно. Я далек от того, чтобы давать рекомендации в этом выборе. Современная теория не может дать ответа на этот вопрос.

Опыт последних лет показывает, что теория меняется за времена более короткие, чем время сооружения таких установок. Я думаю, что эксперименты на встречных пучках на несколько десятков ГэВ прояснят в значительной степени эту дилемму.

В Новосибирске мы в настоящее время работаем одновременно над проектом протон-антипротонного накопительного кольца на тысячу ГэВ (эквивалентная энергия $2 \cdot 10^{15}$ эв) и мезонных встречных пучков на энергию в несколько сот ГэВ в каждом. Будем надеяться, что эксперименты на строящихся установках со встречными пучками к моменту окончания этих проектов помогут нам в выборе.